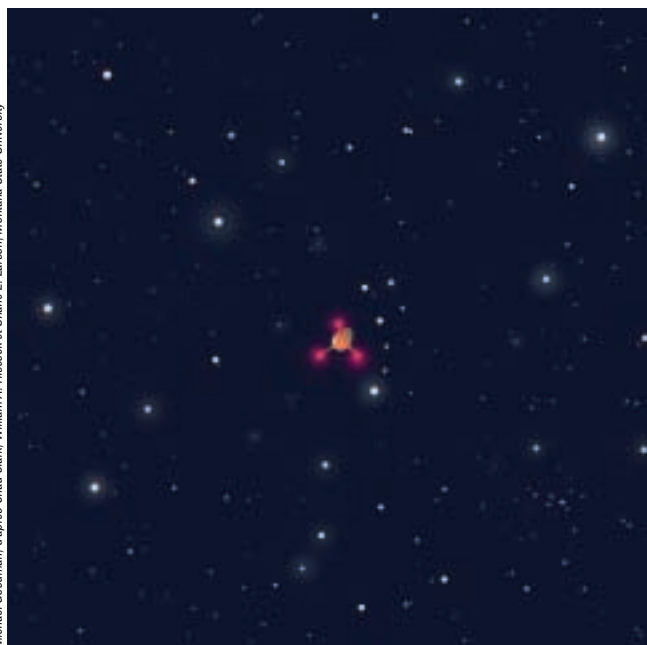




5. DANS UN VAISSEAU STELLAIRE qui se déplacerait plus vite que la lumière en direction de la Petite Ourse (*ci-dessus*), on ne verrait pas les zébrures classiquement représentées par les films de science-fiction, mais une scène analogue à celle qui est montrée ici. Tandis que la vitesse augmente (*à droite*), les étoiles situées devant le vaisseau (*colonne de gauche*) semblent de plus en plus proches de la direction du mouvement et leur couleur vire au bleu. Derrière le vaisseau (*colonne de droite*), les étoiles se rapprochent d'une position directement à l'arrière, rougissent et finissent par disparaître complètement. La lumière provenant d'étoiles situées directement au-dessus ou au-dessous est inchangée.



une région lointaine de l'Univers, tandis que l'énergie positive serait utilisée à des fins pratiques? Cette source apparemment inépuisable d'énergie pourrait servir à la réalisation d'une machine à mouvement perpétuel, qui violerait le deuxième principe. Par exemple, en pointant le faisceau vers un verre d'eau, on rafraîchirait l'eau, tandis que l'énergie positive extraite alimenterait un petit moteur : on obtiendrait ainsi un réfrigérateur qui fonctionnerait sans apport d'énergie. En réalité, une impossibilité survient, non pas en raison de l'idée d'énergie négative, mais parce que l'on ne peut pas séparer sans restriction l'énergie négative et l'énergie positive.

L'existence d'énergie négative aurait également des conséquences importantes en cosmologie. Quand l'énergie dégagée par les réactions thermonucléaires devient insuffisante pour équilibrer l'attraction gravitationnelle des étoiles, celles-ci s'effondrent sur elles-mêmes et forment parfois un trou noir : une «singularité» de l'espace-temps qui correspond à une région de l'espace où l'intensité du champ de gravitation devient infinie. La relativité générale (et les autres lois de la physique) n'in-

dique pas comment l'Univers évolue dans cette région : cette ignorance est une des grandes lacunes de la description mathématique de la nature. Tant que la singularité reste à l'intérieur d'un horizon des événements, on peut décrire l'Univers à l'extérieur de cet horizon. C'est pour cette raison que Roger Penrose, à Oxford, a proposé l'hypothèse de «censure cosmique» : aucune singularité n'est nue, c'est-à-dire sans horizon des événements.

Pour certains types de trous noirs électriquement chargés ou en rotation, connus sous le nom de trous noirs extrêmes, une infime augmentation de la charge ou de la vitesse de rotation, ou une diminution de la masse, détruiraient l'horizon des événements et transformeraient le trou noir en une singularité nue. L'augmentation de la charge ou de la vitesse de rotation de ces trous noirs à l'aide de matière ordinaire semble irréalisable pour diverses raisons. En revanche, on pourrait réduire la masse du trou noir en brquant un faisceau d'énergie négative sur le trou, ce qui mettrait en défaut

le principe de la censure cosmique. On créerait un tel faisceau à l'aide d'un miroir mobile, par exemple. En principe, une infime quantité d'énergie négative suffirait à changer radicalement l'état d'un trou noir extrême. C'est ainsi que l'énergie négative aurait le plus de chances de produire des effets macroscopiques.

Ni isolé ni de même amplitude

Malheureusement (ou heureusement, selon le point de vue), bien que la théorie quantique admette l'existence d'énergie négative, elle prescrit des limites à son amplitude et à sa durée. Ces inégalités quantiques ont été évoquées pour la première fois par L. Ford, en 1978 ; depuis, elles ont été démontrées et affinées.

Ces inégalités ressemblent au principe d'incertitude d'Heisenberg. Elles stipulent qu'un faisceau d'énergie

négligeable ne peut pas être arbitrairement intense pendant un temps arbitrairement long. L'amplitude de l'énergie négative est inversement proportionnelle à son étendue spatio-temporelle : une impulsion intense d'énergie négative ne dure qu'un temps très bref ; une impulsion faible dure plus longtemps. De surcroît, une impulsion initiale d'énergie négative est nécessairement suivie d'une impulsion d'énergie positive d'intensité supérieure (voir la figure 6). Plus l'amplitude de l'énergie négative est importante, plus sa contrepartie en énergie positive doit arriver peu de temps après. On peut se représenter l'énergie négative comme un prêt énergétique : de la même manière qu'une dette est de l'argent négatif que l'on doit rembourser, l'énergie négative est un déficit d'énergie qui doit être compensé. Examinons comment l'analogie se prolonge.

Dans l'effet Casimir, la densité d'énergie négative entre les deux plaques peut persister indéfiniment, mais la densité d'énergie négative n'est notable que si l'écart entre les plaques est très faible : la densité d'énergie négative est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la distance entre les plaques. Les inégalités quantiques indiquent que la densité d'énergie entre les plaques peut être rendue encore plus négative que la valeur observée dans l'effet Casimir, mais seulement temporairement ; plus on réduit la densité d'énergie au-dessous de la valeur Casimir, plus bref est l'état obtenu.

Les inégalités quantiques imposent que les tailles des trous de ver et des tubes de S. Krasnikov soient submicroscopiques ou que l'énergie négative soit restreinte à des bandes extrêmement étroites. En 1996, nous avons calculé que les trous de ver submicroscopiques auraient un rayon inférieur à 10^{-32} mètre environ. Cette longueur est légèrement

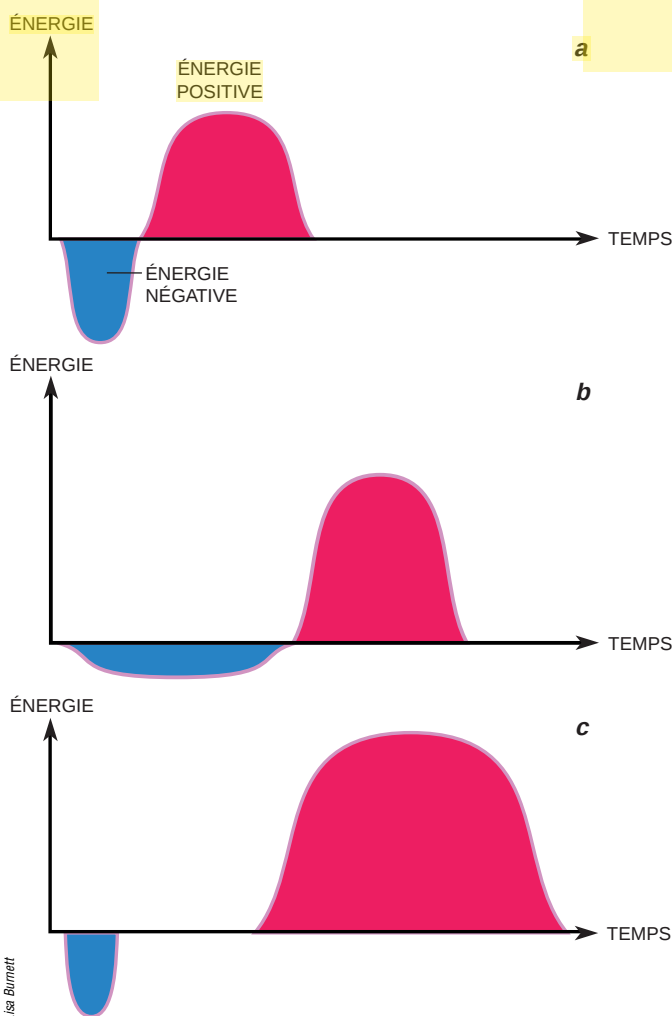
supérieure à la longueur de Planck -10^{-35} mètre -, qui est la plus petite longueur possible ayant un sens physique. Nous avons calculé que l'on pourrait créer des trous de ver macroscopiques si l'on confinait l'énergie négative dans un intervalle extrêmement étroit autour de l'entrée du trou. Par exemple, sous certaines hypothèses, on détermine qu'un trou de ver dont le rayon d'entrée est égal à un mètre contraint l'énergie négative à n'être que dans un intervalle de 10^{-21} mètre, un million de fois plus petit que la taille d'un proton. D'après les estimations de M. Visser, l'énergie négative nécessaire à un trou de ver de cette taille correspond à l'énergie totale émise par dix milliards d'étoiles en un an. Les problèmes sont analogues avec les trous de ver plus

gros. Avec les mêmes hypothèses, l'épaisseur maximale possible de l'intervalle d'énergie négative est proportionnelle à la racine cubique du rayon d'entrée. En augmentant le rayon d'entrée jusqu'à une année-lumière, l'énergie négative reste confinée à une région plus petite que le rayon d'un proton, et la quantité totale nécessaire augmente linéairement avec la taille du trou d'entrée.

Ceux qui voudront maîtriser les trous de ver devront résoudre le difficile problème de confiner de grandes quantités d'énergie négative dans des volumes extrêmement minces. Certaines théories cosmologiques supposent l'existence de «cordes cosmiques», où de très fortes densités d'énergie sont réparties le long de longues lignes étroites, mais tous les modèles de cordes cosmiques physiquement acceptables ont des densités d'énergie positives.

La propulsion par déformation de l'espace-temps semble encore plus difficile. Le modèle de M. Alcubierre, qui considère une bulle d'espace-temps qui se déplacerait dix fois plus vite que la lumière, impose des parois d'une épaisseur maximale de 10^{-32} mètre. Une bulle ne pourrait contenir un vaisseau stellaire de 200 mètres de long que si la quantité totale d'énergie négative était équivalente à dix milliards de fois la masse de l'Univers observable. Les difficultés sont analogues pour le tube supraluminique de S. Krasnikov. Chris Van Den Broeck, à Louvain, a récemment modifié le modèle de M. Alcubierre. Moins d'énergie négative est nécessaire, mais le vaisseau stellaire doit alors rentrer dans une bouteille d'espace-temps courbé dont le goulot aurait moins de 10^{-32} mètre de diamètre. Ainsi, au total, la construction de trous de ver et de couloirs d'espace-temps utilisables semble très improbable.

Les inégalités quantiques empêchent la violation du deuxième principe. Quand on essaie de refroidir



6. DES IMPULSIONS D'ÉNERGIE NÉGATIVE sont envisageables, mais sous certaines conditions. Premièrement, plus l'impulsion est longue, plus elle doit être faible (a,b). Deuxièmement, elle doit être suivie d'une impulsion d'énergie positive. L'amplitude de l'impulsion positive est nécessairement supérieure à celle de l'impulsion négative initiale. Troisièmement, plus les deux impulsions sont séparées dans le temps, plus l'impulsion positive doit être importante : cet effet est nommé «intérêt quantique» (c).